超音速ジェットにおけるヘリカルモード組み合わせの音響場に及ぼす影響

Effects of Combination of Some Helical Modes on sound field in a Supersonic Jet

○正 渡辺大輔 (富山大) 正 前川 博 (電通大)

Daisuke WATANABE, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama-City, Toyama 930-8555

Hiroshi MAEKAWA, The Univ. Electro-Comm., 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

The three-dimensional time dependent compressible Navier-Stokes equations are numerically solved to study acoustic emission nature in a supersonic round jet at high convective Mach number ($M=2.0$) using high-order compact upwind schemes. The numerical results provide new physical insights into Mach wave generation nature in a supersonic round jet. Upstream disturbance conditions play an important role for the emission of the Mach waves in a supersonic jet. The numerical results show that the jet forced with a pair of first helical modes can restrict emission angle of Mach wave due to the modes interference.

Key Words: Supersonic jet, Mach wave, Noise, DNS

1. はじめに

ジェットが超音速では、ノズル背後に形成されるショックセルなどの衝撃波に起因するスクリーチ音、さらに高マッハ数のジェットではマッハ波が発生するなど、亜音速ジェットに比べ周囲環境に耐えがたい騒音が発生する。衝撃波に起因する騒音は、ノズル内部形状の適切化により、衝撃波そのものの発生を抑止し(適正膨張)低減することができる。一方、高マッハ数のジェット騒音を支配するマッハ波は、ジェットせん断層に起こる超音速で進行する不安定波が音源であり、せん断層の急速な拡大により低減できることが予測され、lobe mixers などによる混合促進ノズルが提案⁽¹⁾されているが、近傍マッハ波の増大を引き起こすことが問題になっている。また、排気ジェットを覆う外殻を設置し、それによりマッハ波を反射させる ejector shroud を用いる手法⁽²⁾は、その形状や大きさから、騒音低減に対し大きな推力損失を伴うという重大な欠点が存在する。また、高マッハ数の円形ジェットに対する線形安定性解析⁽³⁾によると、最も高い成長率を示すモードはヘリカルモードであり、このモードは超音速の位相速度を持ちマッハ波を形成させる。このため、円形ジェットにおけるマッハ波低減には平面ジェットのように亜音速のモードによる低減効果⁽⁴⁾は望めない。このような背景から、新たなマッハ波低減手法の模索に対し超音速ジェットの物理的性質を理論的・数値的に調査するとは意義があるといえる。

本研究では、超音速円形ジェットに対し流入攪乱としてランダムな攪乱および線形不安定攪乱を加えることによる音響場への影響を直接数値シミュレーションの実行により調査する。

2. 計算方法

支配方程式は、円筒座標系で記述された圧縮性ナビエ・ストークス方程式である。空間の離散化に対し非線形項を含む移流項には、衝撃波を安定に捕らえるため分散誤差等の影響を考慮した 5 次精度散逸コンパクトスキーム⁽⁵⁾ (境界では 3 次精度)、粘性項に 6 次精度中心コンパクトスキーム⁽⁶⁾ (境界では 4 次精度)を用い計算を行った。また、時間発展には 4 次精度 Runge-Kutta 法を用いた。時間ステップは計算安定性から $dt=0.01$ とした。境界条件は、境界における音波や渦の通過に伴う音波等の反射を可能な限り抑えるために x 方向および r 方向に NSCBC、また周方向には周期境界条件を用いた。また、流入境界においては Freund 等⁽⁷⁾と同様に tanh 型のジェット速度分布を与えた。ジェット中心速度に基づくマッハ数およびレイノルズ数はそれぞれ $M=2.0$, $Re=1000$ とした。

3. 計算結果

流入攪乱としてランダムな速度変動を速度変動 rms 値がジェット中心速度の 3% で与えた際の圧力の等値面および divu の等高線図を図 1 および図 2 にそれぞれ示す。図より、攪乱の成長によってジェット中心を囲むように円弧状に圧力波が分布している様子が確認できる。この結果は線形安定性解析が予測する第一ヘリカルモードの成長率が最も高い⁽³⁾ことや Freund 等⁽⁷⁾の DNS の結果と一致し螺旋モードがマッハ波の形成に大きく寄与していることが分かる。

Fig. 1 Downstream evolution of pressure

Fig. 2 Distribution of divu at $x=20r_0$

次に軸対称モードと第一ヘリカルモード(ジェット軸方向に 1 波長ずれるモード)を流入部に与えた結果を図 3(a)および(b)に示す。両ケースにおいて攪乱振幅はジェット中心速度の 1% とした。軸対称モードケースでは、音響場も軸対称な分布となっており、第一ヘリカルモードケースでは螺旋状に音響場が分布していることが分かる。軸対称モードの成長率

は第一ヘリカルモードに対し低いため音響場に与える影響は小さく、圧力波の等値面を見るとヘリカルモードケースに対しジェットの下流において現れている。

Fig. 3 Distribution of divu at $x=20r_0$ for a) axisymmetric mode and b) helical mode

Fig. 4 Downstream evolution of pressure

Fig. 5 Distribution of divu at $x=20r_0$

流入攪乱として回転方向の異なる第一ヘリカルモードをそれぞれジェット中心速度の 1% で与えた際の音響場の様子を図 4 および図 5 に示す。音響場をみるとランダム攪乱ケースや単一のモードを加えたケースと異なり、圧力波の分布が周方向に大きく偏った分布を示していることが確認できる。これは回転方向の異なるヘリカルモードの位相が揃った位置と π ずれた位置において干渉が起こり、強め合う位置と弱め合う位置が定常的に存在しているためである。この結果、

音響場は図 5 において左右に対し広がる分布を示している。

図 6 に $\theta=0-180^\circ$ の断面と $\theta=90-270^\circ$ 断面の divu の分布を示す。 $\theta=0-180^\circ$ においては、規則的にマッハ波に伴う圧縮膨張波がジェット外部に広がっているのに対し、 $\theta=90-270^\circ$ ではマッハ波がほとんど見られないことが分かりヘリカルモード間の干渉によりマッハ波が抑制されていることが分かる。

Fig. 6 Distribution of divu for (a) $\theta=0-180^\circ$ plane and (b) $\theta=90-270^\circ$ plane

4. まとめ

$M=2.0$, $Re=1000$ の超音速円形ジェットの DNS を実行し以下の結論を得た。

- ・回転方向の異なるヘリカルモードペアを流入攪乱として加えた場合、干渉により定常的な放射方向の偏りを確認した。
- ・ヘリカルモードの位相が π ずれた位置 ($\theta=90-270^\circ$ 断面) においてマッハ波が抑制されていることを確認した。

引用文献

- (1) SEINER, J. M., and KREJSA, E., "Supersonic Jet Noise and the High-Speed Civil Transport", *AIAA Paper*, No. 89-2358(1989).
- (2) NAGAMATU, H. T., SHEER, R. E. and GILL, M. S., "Characteristics of Multitude Multishroud Supersonic Jet Noise Suppressor", *AIAA J.* 10, 3(1972), pp.307-313.
- (3) LUO, K. H. and SANDHAM, N. D., "Instability of vortical and acoustic modes in supersonic round jets", *Phys. of Fluid* 9(1997), 4, pp.1003-1013.
- (4) 渡辺大輔 & 前川 博, "超音速平面乱流ジェットの音響場に対する斜め不安定モードの影響", 日本機械学会論文集(B 編) 72, 724, (2006), 2878-2885.
- (5) DENG, X., MAEKAWA, H. and SHEN, C., "A Class of High Order Dissipative Compact Schemes", *AIAA Paper*, No. 96-1972(1996).
- (6) POINSOT, T. J. and LELE, S. K., "Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows", *J. Comput. Phys.* 101(1992), pp.104-129.
- (7) FREUND, J. B., LELE, S. K. and Moin, P., "Numerical Simulation of a Mach 1.92 Turbulent Jet and Its Sound Field", *AIAA J.* 38(2000), 11, pp.2023-2031.